文章编号:1673-5005(2016)03-0130-06

自生热泡沫体系在多孔介质中协同作用机制

王 飞1,李兆敏1,李松岩1,李金洋1,陈海龙1,胡伟毅2

(1. 中国石油大学石油工程学院,山东青岛 266580; 2. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工程技术公司,山东东营 257064)

摘要:自生热泡沫体系是将自生热体系和泡沫流体相结合得到的体系。设计研发自生热泡沫多孔介质反应测量装置,包括注入系统、测量系统及出口计量系统,用于研究自生热泡沫体系在多孔介质中的作用机制。研究表明:自生 热泡沫体系在多孔介质中呈现出化学反应与泡沫的协同作用,泡沫可以调节化学反应温度分布,使化学反应产热均 匀加热岩心,并延缓后续热量散失;利用化学药剂在地层中反应产生泡沫,可以增强泡沫封堵性能;在岩心内部,化 学反应程度随渗透率增加而增加,最高反应程度约50%,但泡沫不影响化学反应程度。通过理论计算验证了试验结 果的正确性,该体系尤其适用于海上稠油开采。

关键词:自生热体系;泡沫;多孔介质;协同作用;温度分布;反应程度

中图分类号:TE 357.46 文献标志码:A

引用格式:王飞,李兆敏,李松岩,等. 自生热泡沫体系在多孔介质中协同作用机制[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(3):130-135.

WANG Fei, LI Zhaomin, LI Songyan, et al. Mechanism study of a chem-pyrogenic-foam system in porous media[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016, 40(3):130-135.

Mechanism study of a chem-pyrogenic-foam system in porous media

WANG Fei¹, LI Zhaomin¹, LI Songyan¹, LI Jinyang¹, CHEN Hailong¹, HU Weiyi²

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Drilling Engineering Technology Company, Shengli Petroleum Engineering Company Limited,

SINOPEC, Dongying 257064, China)

Abstract: A chem-pyrogenic-foam system can be formulated by combining chemicals with pyrogenic capability and foam fluids. In this study, a core flooding device was designed and used for studying the process of chem-pyrogenic-foam in porous media, which can simulate the injection of chemicals and measure the reaction products. The results show that the chem-pyrogenic-foam system can provide a synergistic effect on chemical reaction and foam generation. The formation of foams can adjust the temperature distribution, which makes heat more uniformly distributed along the core and can reduce the heat loss. Using chemical agents to generate foam in-situ in the formation can enhance the sealing performance of the foam in the core. The chemical reaction can be promoted with the increase of the permeability of the core, and a conversion rate of 50% can be achieved. The foams formed in the porous media have little effect on the process of chemical reaction. The experimental results were also analyzed via theoretical calculation. The chem-pyrogenic-foam system is particularly suitable for offshore heavy oil recovery where gas injection for foam generation is not available.

Keywords: chem-pyrogenic system; foam; porous media; synergistic effect; temperature distribution; reaction degree

泡沫流体在解决油藏非均质问题、改善产液剖面、提高中低渗储层驱替效率等方面作用明显,国内

外学者做了大量研究^[1-11],但一些情况下常规注氮 气泡沫技术的应用受到限制。稠油油藏开采中,普

收稿日期:2015-06-23

作者简介:王飞(1988-),男,博士研究生,研究方向为采油工程及泡沫流体技术。E-mail:goodboygreatman@163.com。

通泡沫调驱不能携带热量,效果较差;海上油藏开采 中,受空间、安全等因素制约,制氮设备未能大规模 普及。自生热体系是通过化学反应产生大量热量的 化学体系,主要用于解堵清蜡^[12-17]。将自生热体系 和泡沫流体结合应用已成为一个新方向,目前研究 集中在自生热或生成气体的利用方面^[18-21],而对于 化学反应产热和泡沫共同作用机制,特别是在多孔 介质中的作用研究较少。笔者利用设计研发的自生 热泡沫多孔介质反应测量装置,对自生热泡沫体系 在多孔介质中的协同作用机制进行研究。

1 自生热泡沫体系原理

自生热泡沫体系是将起泡剂加入自生热体系 中,控制反应使其在注入地层后发生反应并产生热 量和泡沫的过程,如图1所示。

自生热体系目前主要有碱金属体系、铵盐/亚硝酸盐体系、碳酸氢铵分解体系、多羟基醛体系、过氧 化氢生热体系等,本文中采用铵盐/亚硝酸盐体系,

 $\mathrm{NH}_{4}^{+} + \mathrm{NO}_{2}^{-} \longrightarrow \mathrm{H}_{2}\mathrm{O} + \mathrm{N}_{2}\uparrow$.

起泡剂的选择主要考虑耐盐性,而对于自生热 产热需要的耐温性能也可适当考虑。



2 试 验

2.1 试验材料

NH₄Cl(分析纯)、NaNO₂(分析纯)、酸 A(催化剂)、起泡剂 B。配置 NH₄Cl、NaNO₂ 溶液浓度为 3.5 mol/L。起泡剂加入的质量分数为 0.7% (最优值)。

2.2 试验装置

自生热泡沫体系驱替装置可以对注入过程中压 力和温度变化及岩心内部温度进行测量。同时可以 对岩心内部气相饱和度变化等通过测量进行计算。 如图 2 所示,该装置分为注入系统、岩心测量系统和 出口计量系统。注入系统包括泵、中间容器、六通阀 等,主要是将两种反应溶液同时注入岩心,确保两种 溶液按1:1比例进入岩心;岩心测量系统主要包括 改装岩心管、压力传感器、温度传感器、计算机、回压 阀等,主要测量压力和温度两部分,记录岩心驱替过 程中压力及温度变化,用以分析岩心内部产热及泡 沫的作用机制;出口计量系统包括气液分离器、气体 流量计、天平等,主要用来记录产液量及产气量,可 以此进行岩心内部饱和度和岩心内部反应状况的计 算。



foam experiment

2.3 试验原理

对于自生热泡沫体系在多孔介质中作用机制的 研究,目前主要集中在岩心驱替渗流规律的研究上, 其中计算用于评价封堵性的阻力因子和气相饱和度 的较多,原理也较为简单。对于岩心内部温度及化 学反应程度衡量等机制研究评价较少。

(1)温度。为了分析泡沫对于温度分布的影响,计算从入口到出口4个测温点(测温点1、2、3、4)温度值的变异系数。

变异系数是衡量各观测值变异程度的统计量, 可以客观地反映数据的离散程度,是标准差与平均 值的比。一般来说,变异系数越大,离散程度越大, 说明数据之间差别较大,具体到温度则为岩心内部 温度差异较为明显。变异系数(*C*_v)计算公式为

$$C_{\rm v} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (T_i - \overline{T})}.$$
 (1)

式中,n=4; 7为4个测温点温度平均值,℃。

(2)阻力因子(*R_F*)。阻力因子是指相同流量下 岩心泡沫驱两端压差与水驱压差之比,是评价泡沫 封堵能力的重要指标。对于自生热泡沫体系,以注 入结束时刻压差作为标准。

$$R_{\rm F} = \frac{\Delta p_{\rm f}}{\Delta p_{\rm w}}.$$
 (2)

式中, $\Delta p_{\rm f}$ 为泡沫驱压差, ${\rm Pa};\Delta p_{\rm w}$ 为水驱压差, ${\rm Pa}_{\circ}$

(3)岩心内部化学反应程度(σ)计算。岩心内部化学反应程度计算是通过标准状态(25 ℃, 101 325 Pa)下实际产气与理论产气的比值来衡量的,而实际产气量包括出口与岩心内部气体。

$$\sigma = \frac{V_{\rm a}}{V_{\rm t}} = \frac{V_{\rm in} + V_{\rm ou}}{V_{\rm t}} \,. \tag{3}$$

式中, V_a 为标准状态下实际产气量, L; V_t 为标准状态下理论产气量, L; V_{in}为岩心内部产气量在标准状态下折算值, L; V_{ou}为出口产气量在标准状态下折算值, L; V_{ou}为出口产气量在标准状态下折算值, L。

岩心内部气体折算值:

$$\frac{p_{\rm sc}V_{\rm in}}{T_{\rm sc}} = \frac{p_{\rm c}V_{\rm c}}{T_{\rm c}} \,. \tag{4}$$

式中, T_{sc} 和 T_{c} 分别为标准状态下和岩心内部温度, \mathbb{C} ; p_{sc} 和 p_{c} 分别为标准状态下和岩心内部压力, Pa; V_{in} 和 V_{c} 分别为标准状态下和岩心内部产生的气体体积, L。

岩心内部压力计算采用分段平均,流程图中4 个测压点将岩心分为3段,首先在每一段上取平均, 再对3段取平均值:

$$p_{c} = \frac{(p_{1}+p_{2})/2 + (p_{2}+p_{3})/2 + (p_{3}+p_{4})/2}{3} = \frac{p_{1}+2p_{2}+2p_{3}+p_{4}}{6}.$$
 (5)

(4)结果验证。为了验证试验结果的正确性, 综合化学反应程度,岩心气相饱和度,利用化学反应 理论产热值,计算岩心管温度上升值。对比测温结 果。由比热容公式:

 $Q = cm\Delta T$,

得到

$$T - T_0 = \Delta T = \frac{Q}{cm} = \frac{q_0 V \sigma}{c_1 m_1 + c_s m_s + c_g m_g + c_r m_r} \,. \tag{6}$$

式中, T_0 为初始温度, \mathbb{C} ;T为当前温度, \mathbb{C} ; q_0 为单 位体积溶液的反应产热量,J/L; q_0 为注入体积,L; σ 为反应程度; c_1, c_s, c_g 和 c_r 分别为岩心管内部液体、 固体、气体以及岩心管比热容, $J/(kg \cdot \mathbb{C})$; m_1, m_s, m_g 和 m_r 分别为岩心管内部液体、固体、气体以及岩 心管质量, kg_o

2.4 试验方法

为了得到自生热泡沫体系在多孔介质中的作用 机制,特别是化学反应和泡沫之间的相互作用机制, 本试验设计了两部分试验内容:一是泡沫对温度分 布的影响;二是化学生热体系对泡沫封堵性的影响。 泡沫对化学反应产热分布的温度影响主要试验步骤 为:①将恒温箱内部温度控制到 60 ℃,确保化学反 应剧烈;②自生热体系加起泡剂(自生热泡沫体系) 进行岩心驱替试验,首先注入自生热泡沫体系 1*V*_p (*V*_p 为孔隙体积),注入速度 1 mL/min,后续水驱 1*V*_P,期间测量岩心内部温度及压力变化等;③自生 热体系不加起泡剂(自生热体系)重复上述过程,与 加起泡剂试验进行对比。化学生热体系对泡沫封堵 性的影响主要试验步骤为:①将恒温箱内部温度控 制到 60 ℃,确保化学反应剧烈;②自生热体系加起 泡剂进行岩心驱替试验,首先注入自生热泡沫体系 1*V*_P,注入速度 1 mL/min,后续水驱 1 *V*_P,期间测量 压力及出口产液量等;③常规泡沫对比试验。

3 试验结果分析

3.1 泡沫对生热体系产热温度分布的影响

(1)自生热泡沫体系在岩心内部温度分布如图3 所示。由图3可看出,随着自生热泡沫体系的注入,4 个测温点温度持续上升,体现的是自生热体系反应放 热过程;在该体系注入结束时刻,最高温度达到最大 74 ℃,温度上升约15 ℃;后续水驱过程,由于化学药 剂被逐渐驱出,热量被携带出岩心,同时反应量逐渐 减少,残余泡沫缓冲了热量散失过程,温度缓慢下降。 在注自生热泡沫体系驱替阶段,4 个测温点温度变化 相差不大;后续水驱中靠近入口端温度略高。



Fig. 3 Variation of temperature of chem-thermogenicfoam system with time

(2)自生热体系在岩心内部温度分布如图 4 所 示。由图 4 可以看出:随着自生热体系的注入,靠近



Fig. 4 Variation of temperature of chem-thermogenic system with time

入口的测温点1和测温点2温度持续上升,体现的 是自生热体系反应放热过程,在该体系注入结束时 刻,最高温度达到75.8℃;后续水驱过程中,由于化 学药剂被逐渐驱出,同时热量被携带出岩心,导致反 应溶液量逐渐减少,温度迅速下降;靠近出口处测温 点3和测温点4温度变化不大。自生热体系注入阶 段,4个测温点温度逐渐拉大,后续水驱随温度下 降,温度向初始温度逐渐靠拢。

(3) 温度变异系数对比如图 5 所示。图 5 为上 述自生热体系和自生热泡沫体系情况下 4 个测温点 温度的变异系数变化对比,明显可以看出,当岩心内 部不存在泡沫时,温度变异系数较大,最高接近 10%,而加入泡沫后温度变异系数在 3% 以下。最 高点在自生热驱替结束、水驱开始前。



Fig. 5 Variation of temperature coefficient with time

图 6 为根据测量的数据得到的注入 1V_p 生热体 系后温度相关数据绘制的岩心管温度场分布。可以 明显看出,自生热泡沫体系驱替(含泡沫)时,岩心 内部温度分布较为均匀且较高,自生热体系驱替 (无泡沫)时,岩心入口与出口温度差异较大。





一方面,泡沫的存在以及圈闭气体的性质导致 气体在靠近入口区聚集,入口处有效渗透率降低,而 后续反应溶液转入岩心靠出口部分。反应产热会在 前后两部分进行得比较均匀,而不加起泡剂导致溶 液大部分在靠近入口区反应,到达出口时反应基本 已经完成,产热升温较少;另一方面,岩心中大量圈 闭气体的存在会使岩心内部整体导热系数降低,热 量保持较好。体现了泡沫可以调节温度分布、延缓 热量散失的特点。

3.2 化学生热体系对泡沫封堵性的影响

比较自生热泡沫体系和常规泡沫体系(最佳气液 比)在不同渗透率下的阻力因子变化,如图7所示。 由图7可以看出,自生热泡沫体系阻力因子随渗透率 增加呈增加趋势,体现了泡沫对高渗层的封堵能力, 而相对常规泡沫(最大封堵性能),自生热泡沫体系的 阻力因子较大,是由于该体系产生气泡方式与常规泡 沫不同,常规泡沫是以气液两相注入,在到达岩心前 起泡,中间经过了不断聚并破裂重排过程,而该体系 属于注入岩心后在岩心内起泡,由于化学反应的存 在,泡沫能持续稳定的产生,生成的泡沫较为均匀且 气体较多,泡沫质量较高、泡沫稳定性更好。



and permeability

3.3 自生热泡沫体系化学反应程度

利用式(3)计算对比自生热体系和自生热泡沫 体系的驱替反应程度,结果如图 8 所示。由图 8 可以 看出,两种情况下驱替反应程度变化趋势基本相同, 随着自生热体系的注入,反应程度逐渐增加,取(0.5 ~1.0)V_p反应平衡稳定阶段的反应程度作为衡量标 准(以下相同),两种情况下反应程度约为 36%。



图 9 为自生热泡沫体系与自生热体系化学反应 程度随渗透率的变化曲线。可以看出,两种情况下 化学反应程度趋势相同,排除了泡沫的存在对反应 程度的影响,佐证了泡沫确实对温度有调控作用;随 着渗透率的增加,化学反应程度逐渐增加,最高约为 50%。这是由于渗透率增加使岩心内部两种溶液更





图 9 岩心内部反应程度随渗透率变化曲线

Fig. 9 Relations of the degree of chemical reaction and permeability



3.4 试验结果验证

利用式(6)对自生热泡沫体系和自生热体系化 学反应产热导致的岩心管温度变化进行理论计算, 并与实际测量的4个测温点的温度平均值进行对比 验证,结果如图10所示。理论计算选取的反应程度 是结合产气反推得到的,而比热容也是对整个岩心 的大体计算,结果存在一定偏差,但在误差范围内, 由图10可以看出,理论计算结果与试验结果吻合良 好。



图 10 理论与实测温度平均值对比

Fig. 10 Comparison of theoretical and experimental temperature

4 结 论

(1)设计了自生热泡沫多孔介质反应测量装置,分为注入系统、岩心测量系统和出口计量系统。 实现了对自生热泡沫体系渗流过程中温度、化学反应程度和阻力因子等参数的测量,理论计算值与试验结果吻合良好。

(2)泡沫可以调节温度分布,改善化学反应加 热温度剖面,并延缓热量散失。试验中自生热泡沫 体系驱替中,靠近入口端与出口端温度差异较小,沿 整个岩心管温度变异系数较小,温度分布更加均匀; 而自生热体系驱替中靠近入口端与出口段温度差异 较大,温度分布向入口端集中。

(3)利用化学反应在地层中形成泡沫,自生泡 沫封堵性能比常规泡沫强。试验中自生热泡沫体系 阻力因子高于常规泡沫的。驱替中多孔介质内部反 应程度约为50%,渗透率越大化学反应程度越高。

参考文献:

- FALLS A H, MUSTERS J J, RATULOWSKL J. The apparent viscosity of foams in homogeneous bead packs
 [J]. SPE Reservoir Engineering, 1989,4(2):155-164.
- [2] LOURENCO A M F, MISKA S Z. Study of the effects of pressure and temperature on the viscosity of drilling foams

and frictional pressure losses [J]. SPE Drilling & Completion, 2004, 19(3):139-146.

- [3] EJOFODOMI E A, ZHU D. Evaluating bottomhole pressure for foamed acid stimulation[R]. SPE 98163,2006.
- [4] 王敬,刘慧卿,张红玲,等. 多因素影响的泡沫驱数值 模拟方法[J].石油学报,2014,35(5):915-921.
 WANG Jing, LIU Huiqing, ZHANG Hongling, et al. Numerical simulation of foam flooding influences of multifactors[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014,35(5):915-921.
- [5] 李兆敏,孙茂盛,林日亿,等. 泡沫封堵及选择性分流 实验研究[J]. 石油学报,2007,28(4):115-118.
 LI Zhaomin,SUN Maosheng, LIN Riyi, et al. Laboratory study on foam plugging and selective divided-flow [J]. Acta Petrolei Sinica,2007,28(4):115-118.
- [6] 杨浩,岳湘安,赵仁保,等. 多孔介质中泡沫封堵有效 期评价[J].石油学报,2009,30(5):735-739.
 YANG Hao,YUE Xiangan,ZHAO Renbao, et al. Validity evaluation of foam plugging in porous media [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(5):735-739.
- [7] 周生田,李兆敏,王飞.水平井泡沫酸化分流数值模拟
 [J].石油学报,2012,33(3):448-452.
 ZHOU Shengtian, LI Zhaomin, WANG Fei. Numerical simulation on the foam acidizing diversion in horizontal wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(3):448-452.
- [8] 孙乾,李兆敏,李松岩,等. SiO₂ 纳米颗粒稳定的泡沫 体系驱油性能研究[J].中国石油大学学报(自然科学

版),2014,38(4):124-131.

SUN Qian, LI Zhaomin, LI Songyan, et al. Oil displacement performance of stabilized foam systemby SiO₂ nanoparticles[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4):124-131.

[9] 孙晓飞,张艳玉,李星民,等. 基于试验拟合的泡沫油 油藏模拟模型评价及渗流机制研究[J].中国石油大 学学报(自然科学版),2013,37(4):114-118.

> SUN Xiaofei, ZHANG Yanyu, LI Xingmin, et al. Simulation model evaluation in foamy oil reservoir and percolationmechanism study based on experimental matching [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(4):114-118.

[10] 李兆敏,王鹏,鹿腾,等.泡沫油衰竭开采后续水驱提高采收率实验研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(3):87-92.

LI Zhaomin, WANG Peng, LU Teng, et al. Experimental study on enhanced foamy oil recovery after solutiongas drive by waterflooding[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2014,38 (3):87-92.

 [11] 李兆敏,吕其超,李松岩,等. 煤层低伤害氮气泡沫压裂液研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013,37(5):100-106.

> LI Zhaomin, LÜ Qichao, LI Songyan, et al. A nitrogen foam fluid with low formation damage for CBM fracturing treatment[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2013,37(5):100-106.

- [12] DAIVD R, RICHARDSON A. Field application of in-situ nitrogen gas generation system[R]. SPE 9656,1981.
- [13] MITCHELL T I, DONOVAN S C, COLLESI J B, et al. Field application of a chemical heat and nitrogen generating system[R]. SPE 12776,1984.
- [14] MCSPADDEN H W, TYLER M L, VELASCO T T. Insitu heat and paraffin inhibitor combination prove cost effective in NPR#3, Casper, Wyoming[R]. SPE 15098, 1986.
- [15] ASHTON J P, KIRSPEL L J, NGUYEN H T, et al. Insitu heat system stimulates paraffinic-crude producers in

Gulf of Mexico [R]. SPE 15660,1989.

- [16] KHALIL C N, FRANCO Z A. Improving matrix acidizing with nitrogen and heat in-situ generation [R]. SPE 21113,1990.
- [17] 潘昭才,李颖川,阳广龙,等. 一种新的化学生热体系 在油井清蜡中的应用[J]. 石油钻采工艺,2006,28 (6):74-75.

PAN Zhaocai, LI Yingchuan, YANG Guanglong, et al. Application of a new chem-thermogenic system in oil well paraffin removal [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006,28(6):74-75.

[18] 吴明安,陈茂涛,顾树人,等. NaNO₂ 与 NH₄Cl 反应动 力学及其在油田的应用研究[J]. 石油钻采工艺, 1995,17(5):60-64.

> WU Ming'an, CHEN Maotao, GU Shuren, et al. Study on the reaction kinetics of sodium nitrite with ammonium chloride and its applications in oil fields [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1995,17(5):60-64.

- [19] 蒲万芬,彭陶钧,龚蔚,等. 自生泡沫驱油机理研究
 [J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(2):118-120.
 PU Wanfen, PENG Taojun, GONG Wei, et al. Mechanism study of self-generating foam displacing oil [J].
 Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008,27(2):118-120.
- [20] 蒲春生,石道涵,秦国伟,等. 高温自生气泡沫室内实验研究[J]. 特种油气藏,2010,17(3):90-92.
 PU Chunsheng, SHI Daohan, QIN Guowei, et al. Experimental study on high-temperature self-generated gases foam [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2010,17 (3):90-92.
- [21] 吴金桥,张宁生,吴新民,等. 微胶囊包裹化学生热压 裂液体系及其工艺技术研究[J]. 石油学报,2005,26 (5):115-122.

WU Jinqiao, ZHANG Ningsheng, WU Xinmin, et al. Fracturing fluid with microencapsulated heat-generating system and corresponding technology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005,26(5):115-122.

(编辑 李志芬)